

装配式组合结构新型板墙体系节点性能研究

刘殿忠, 李 妞, 刘 寒

吉林建筑大学 土木工程学院, 长春 130118

摘要: 装配式组合结构因其具有安装便捷、施工工期短、可循环利用等优点, 受到广泛关注。本文对一种可运用于装配式组合结构板墙体系中的新型连接节点进行试验研究。为了验证该新型连接节点的可靠性, 设计采用了节点拟静力试验, 同时采用ABAQUS软件对该节点进行有限元分析, 将模拟所得到的结果与试验结果进行对比, 结果表明: 该新型连接节点施工方便, 可有效缩短工期; 在受力上符合抗震设计要求, 极限位移相对较大, 具有较好的变形能力和延性性能。

关键词: 装配式节点; 拟静力试验; ABAQUS

中图分类号: TU 398

文献标志码: A

文章编号: 2095-8919(2024)04-0001-07

DOI: 10.20203/j.cnki.2095-8919.2024.04.009

Research on the node performance of new panel wall system of assembled modular structure

LIU Dian - zhong, LI Niu, LIU Han

School of civil engineering, Jilin Jianzhu university, Changchun 130118, China

Abstract: Assembled modular structure has the advantages of convenient installation, short construction period, recycling, etc., which is in line with China's advocacy of building ecological civilization, building a beautiful China, assembly building is in a period of vigorous development, so it is very important to carry out relevant research on assembled modular structure. In this paper, a new type of connection node which can be applied to the panel-wall system of assembled modular structure is investigated. In order to verify the reliability of this new type of connection node, the design adopts the proposed static test of the node, and at the same time, the node is analyzed by finite element analysis using ABAQUS software, and the results obtained from the simulation are compared with the test results. The results show that the new type of connection node is easy to construct and can effectively shorten the construction period; it meets the requirements of seismic design in terms of force, and the ultimate displacement is relatively large, with good deformation capacity and ductility performance.

Key words: assembly node; proposed static test; ABAQUS

0 引言

装配式建筑具有构件精细准确、施工便捷、施工安全、节约材料等优点, 符合绿色建筑标准, 在我国建筑行业运用日趋广泛^[1]。装配式组合结构是指建筑的结构系统由不同材料预制构件装配而成。按照预制构件材料组合的不同, 分成不同类型。目前, 国内外对装配式钢结构、混凝土结构研究较多, 而对装配式组合结构研究较少^[2], 对预制构件的节点连接研究更是少之甚少^[3-4]。当前, 国内外应用较多的节点连接方式皆为在混凝土或灌浆料浇筑及养护完成之后才能将预制构件连成一个整体^[5-8], 而本试验研究提出的新型节点连接方式, 虽然也有后浇混凝土, 但在浇筑前各预制构件已通过自攻钉连成一体, 使其拥有足够的承载能力, 可以直接进行下一层施工, 可有效缩短施工工期。同时, 该连接方式无需预先打孔, 既省去了预先打孔的

收稿日期: 2024-03-12.

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20190303030SF).

作者简介: 刘殿忠(1960~), 男, 吉林省长春市人, 教授, 博士. E-mail: dz105@163.com

麻烦,也解决了施工时精准对位难的问题^[9],极大地提高了施工效率。因此,对该新型节点连接进行试验研究不仅为今后装配式结构的发展提供一定的实验依据,也为今后在实际工程中的应用打下良好的理论基础。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

本试验共制作了2个相同的组合板节点试件1和试件2。试件制作包括预制和安装两个环节,其中上下墙和左右板是预制的,节点区混凝土是后浇的。两者的板与墙宽度均为1.1 m,在此宽度区间内布置了4根冷弯薄壁槽钢,且槽钢与槽钢之间的距离均为300 mm,中间两个槽钢布置成背对背方向,两边分别与中间槽钢同向,槽钢间采取横向扁钢,通过钻尾自钻螺钉(简称“自攻钉”)完成拉结,使其形成一个整体性的型钢骨架,钢材间均通过自攻钉进行连接,连接完成后进行混凝土浇筑。待预制板、墙养护完成后进行安装,先固定下墙安装左右板再安装上墙,安装完成后进行节点区混凝土的浇筑。安装时通过在上下墙设立导梁并在上下导梁之间放置切掉两端部分翼缘且弯折的C型钢(图1中件1),再用板条将其连接打入自攻钉使之形成整体,保证上下墙之间连接的整体性,将左右板的型钢采用背靠背的形式与件1用自攻钉连接,再用比板型钢较小的C型钢(图1中件3)嵌入左右板型钢接触处,由此使左右板具备良好的连续性,再通过自攻钉来连接它与件1,保证连接区段型钢之间的连续性,如图1所示。

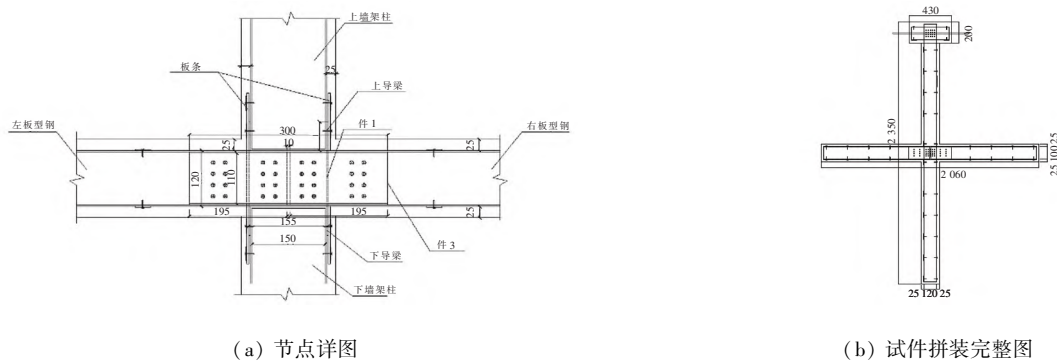


图1 新型组合结构板墙节点

Fig. 1 Node of new combined structural slab wall

1.2 试件加载方案

由于本试验的研究对象主要是板端塑性铰以及核心区,在建筑抗震规范中规定“对平面框架的节点试件进行加载时,研究重点应放在结构的核心节点区与梁端塑性铰上,且在不对试件考虑二阶效应的情况下,对梁柱节点进行试验时一般采用梁-柱试验装置来完成”。由于该试验不需要考虑二阶效应,参照此规范,试验选用“板-墙试验装置”来完成试验。为使试件顶部和底部的水平位移能受到一定的限制,并且具有一定的转动能力,采取替代的形式来约束墙顶墙底的位移,如图2所示。

采用行程为200 mm、力为2 000 kN的作动器对试件的墙顶施加恒定轴压力,墙体竖向集中力通过在墙顶跟作动器之间加载梁来实现力的转化,使其平均作用在墙体上。采用行程为250 mm、力为1 000 kN的作动器对左右板端进行往复荷载的施力,试验主要通过位移加载来施加往复荷载。往复荷载下的位移增



图2 整体试验装置

Fig. 2 The overall test setup

量开始时为 2 mm,将其逐级加载,加载一级之后再循环一次,直至其增量为 6 mm,更改其位移增量为 4 mm,每加载一级进行两次循环。

1.3 试件测量方案

测量对象主要有 EPS 混凝土与型钢的应变、板与墙塑性铰区弯曲变形及加载端的位移与荷载等,得到的全部应变数据基本都是来自粘贴在型钢和 EPS 混凝土表面上的应变片。作动器上带有位移与荷载的传感器,可直接得到加载端的详细位移与荷载。节点的弯曲变形需要运用位移计量器测得。

2 试验结果

2.1 试验现象

2 个组合板节点试件 1 和试件 2 的破坏现象基本一致,在加载过程中都会出现裂缝扩展、混凝土脱落与型钢骨架外露、塑性铰形成等现象,试件 1 和试件 2 的具体破坏现象如图 3 所示。通过图中 2 个组合板节点试件 1 和试件 2 的破坏现象可知,加载全阶段下的组合板节点试件的破坏过程可总结如下:在施加墙顶轴压力时上墙会出现细微裂缝,但不会形成较宽、较长的贯通裂缝,轴力加载顺利,比较符合加载预期。对于左右板的加载,前期加载无明显变化,后期左右板会出现新的裂缝,原有裂缝变宽变长后会出现贯通缝,混凝土大部分脱落,露出型钢骨架,左板的裂缝宽度和长度及混凝土脱落程度均大于右板,左板的塑性铰先现雏形,而后右板也完成初步的塑性铰,最后核心区两侧混凝土大部分脱落,露出型钢骨架,左右板充分形成塑性铰,荷载持续下降,试验终止。



(a) 试件 1 节点区混凝土脱落



(b) 试件 2 节点区混凝土脱落



(c) 试件整体破坏

图 3 试件破坏现象

Fig. 3 Specimen damage phenomenon

2.2 荷载-位移曲线分析

根据试验结果,绘制出试件 1 和试件 2 板墙节点左右板的滞回曲线,如图 4 所示。由图 4 可以看出,试件 1 和试件 2 的滞回曲线较吻合,滞回环从初期到末期都是近似以 0 点为对称点,初期加载滞回环的面积较小,后期面积逐渐增大。原因是开始加载力较小,作动器在上下方向仅发生较小的位移,滞回环表现为弹性性质,后面随着加载力不断增大,上下方向发生的位移也越来越大,使得左右板的裂缝逐渐增大,残余变形也随之变大,故滞回环的面积也逐渐增大。加载到后期由于左右板型钢已达到屈服强度,混凝土大块脱落,试件恢复能力下降,滞回环出现较大程度偏离。

试件的耗能能力可以通过滞回曲线所围绕的面积进行计算。试件 1 和试件 2 节点在前期加载时,节点区的损伤较小,其耗能也较低,随着作动器的加载不断增加,耗能也逐级增加。

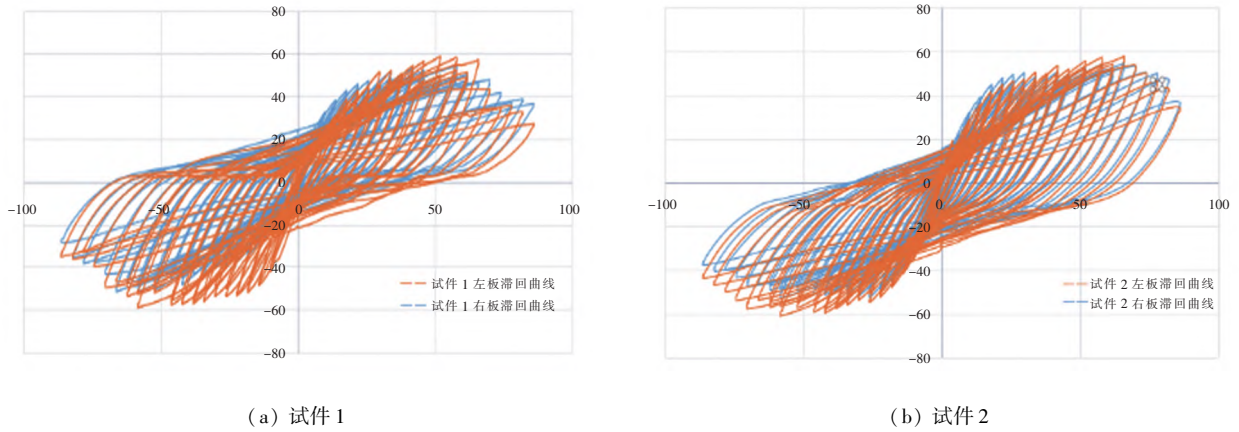


图4 左右板滞回曲线

Fig. 4 Left and right plate hysteresis curves

骨架曲线是在位移大小不同情况下,连接其滞回曲线各级加载的峰值点绘制而成的曲线。由图5可以看出,试件1和试件2的左右板骨架曲线均包含了弹性受力阶段、塑性受力阶段和破坏阶段3个阶段。

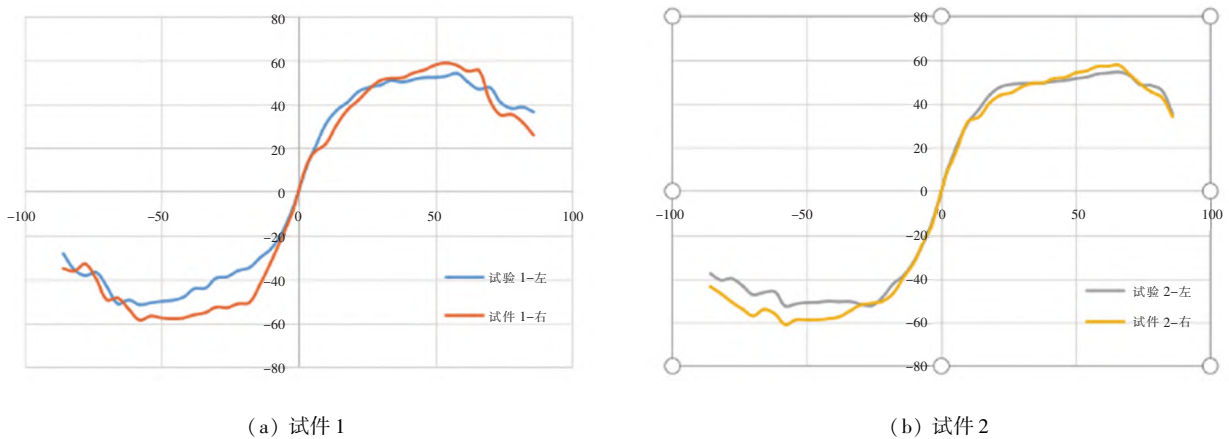


图5 左右板骨架曲线

Fig. 5 Left and right plate skeleton curves

延性可用来衡量建筑结构的抗震性能,结构的延性越好,构件具备的变形能力则越好,在发生破坏前,往往有显著征兆,常用延性系数表示。延性系数由屈服和极限两个位移的比值得到,试件特征点与延性系数见表1。由表1可知,试件1和试件2板墙节点的平均延性系数取值范围比普通钢筋混凝土构件基本延性系数略低,但却有较大的屈服位移。

表1 试件特征点及延性系数

Table 1 Specimen characteristic points and ductility coefficients

试件加载方向	峰值位移/ mm	峰值荷载/ kN	屈服位移/ mm	屈服荷载/ kN	极限位移/ mm	极限荷载/ kN	延性系数	延性系数 平均值
试件1左板加载正向	62	54.08	26.01	47.74	71.00	45.97	2.73	2.56
试件1左板加载负向	-58	-51.59	-30.06	-40.96	-71.54	-43.85	2.38	
试件1右板加载正向	54	58.74	26.93	47.83	67.59	49.93	2.51	
试件1右板加载负向	-58	-58.63	-24.09	-52.06	-65.40	-49.84	2.70	

续表 1

试件加载方向	峰值位移/ mm	峰值荷载/ kN	屈服位移/ mm	屈服荷载/ kN	极限位移/ mm	极限荷载/ kN	延性系数	延性系数 平均值
试件 2 左板加载正向	66	54.44	27.34	48.94	81.47	46.27	2.98	3.07
试件 2 左板加载负向	-58	-52.68	-23.02	-49.63	-72.51	-44.78	3.15	
试件 2 右板加载正向	66	57.60	28.24	46.55	73.99	48.96	2.62	2.75
试件 2 右板加载负向	-58	-61.04	-26.51	-54.02	-76.35	-51.89	2.88	

在反复荷载作用下的试件会发生刚度的逐渐退化,其刚度由割线刚度表示,中节点试件在进行每一级加载时所具有的割线刚度 K_i 如图 6 所示。由图 6 可见,试件 1 和试件 2 的左右板刚度退化曲线是比较吻合的,随着位移量的增加混凝土不断产生新的裂缝并且延伸使其有效面积不断缩小,直到加载后期试件破坏程度不断加大,混凝土大面积脱落导致试件刚度下降。

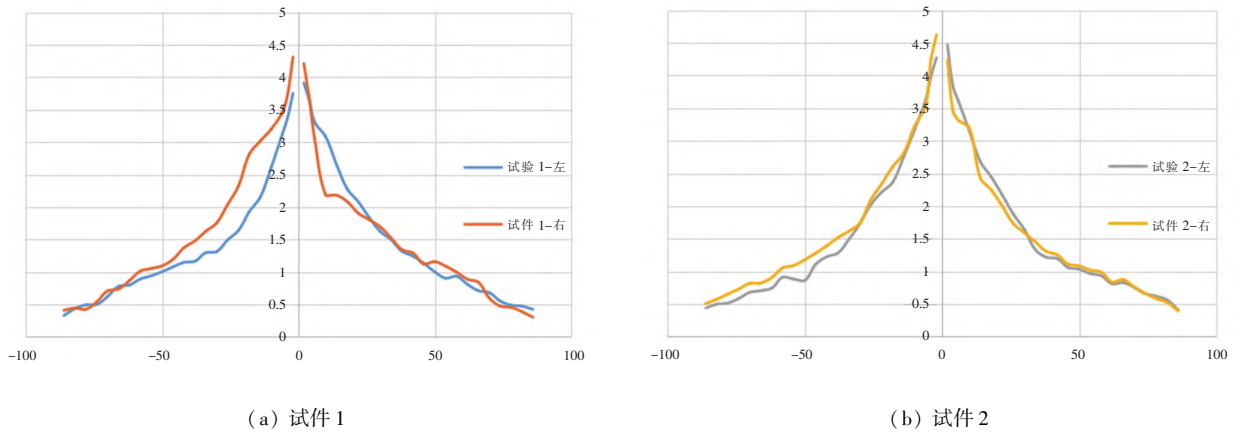


图 6 左右板刚度退化

Fig. 6 Stiffness degradation of left and right plates

2.3 节点有限元分析

考虑到试件是对称结构,试件上所施加的荷载也是对称布置,为提高有限元分析的效率,避免因建模过大而造成的运算失败,选用试件对称中间两道型钢进行建模分析。EPS 混凝土的本构模型由 3 个 150 mm × 300 mm 的棱柱体抗压试件进行抗压试验,归纳分析得出钢材本构模型采用理想弹塑性模型。

混凝土与型钢骨架的应力云图与应变云图如图 7 所示,观察云图可知,当试件正在遭受破坏时,其型钢骨架在节点处所连接的左右区段的应力会相对较大,周边其他地方的应力则较小。混凝土与型钢具有相同的塑性应变,应力集中位置也相同。节点形成塑性铰,破坏模式为板端塑性铰破坏,ABAQUS 有限元模拟的结果与试验时试件的破坏形式完全相同。

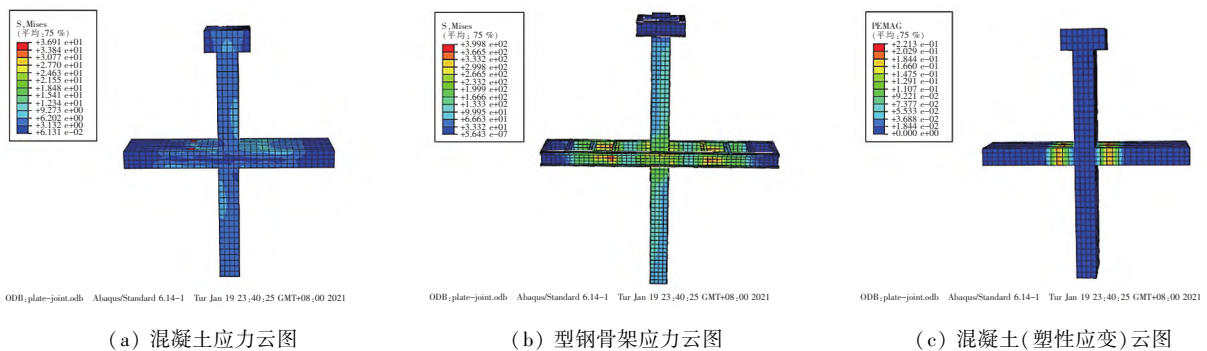


图 7 混凝土与型钢骨架的应力应变云图

Fig. 7 Stress - strain cloud of concrete and steel section skeleton

2.4 对比分析结果

有限元模拟及试验所得的滞回曲线,如图8所示。模拟数据描绘出的荷载—位移曲线与试验滞回曲线相同,其受力阶段有弹性、塑性与破坏3个阶段。将试验跟模拟获得的骨架曲线进行比较发现,模拟比试验的曲线有着更大的初始斜率,由此可以说明模拟所得的刚度大于试验所得,这是因为试件本身存在一些初始损伤,而模拟是在试件处于理想的情况下进行的。总体而言,由模拟所得的荷载—位移曲线较试验是比较优良、效果较好的,模拟数据描绘出的曲线很好地表达了试件此时受力的情况。

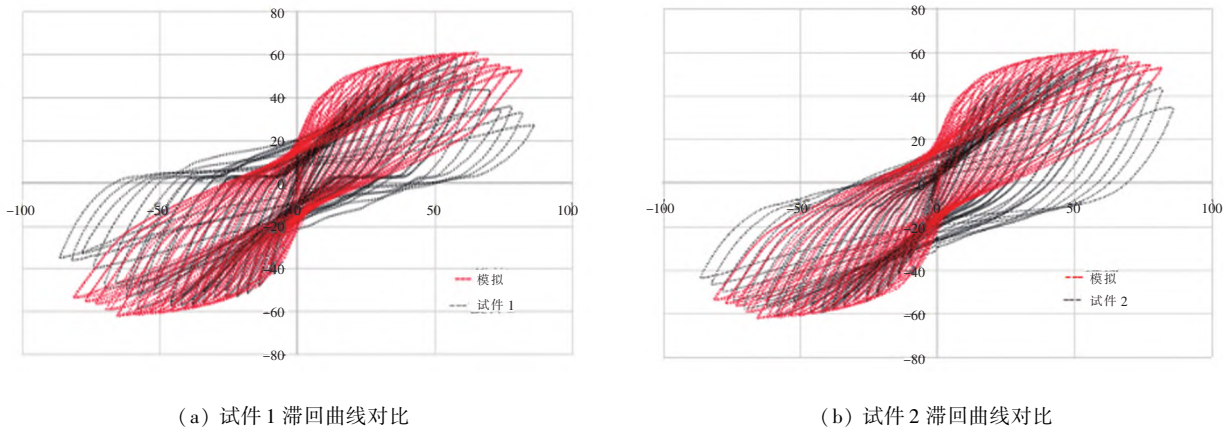


图8 滞回曲线

Fig. 8 Hysteresis curves

根据模拟的位移荷载两个特征值,计算模拟中的延性系数,并与试验结果进行比较发现,模拟极限位移均大于试验值,在最后一级加载时承载力未降低到峰值荷载的85%,正负向的延性系数均达到了3.7以上。由此说明,在理想状态下,该节点的延性较为优良,故在地震作用下可以发生较大的变形而不被破坏。

试件1和试件2的刚度退化与模拟对比,如图9所示。从图中可以看到模拟的刚度退化与试验是比较吻合的,刚度均是随着加载位移的增加而逐渐降低的。模拟初始刚度较大是由于试验试件混凝土存在一定的裂缝及损伤,导致初始的有效面积远小于模拟,故试验的初始刚度数据对比模拟的数据更小一些。

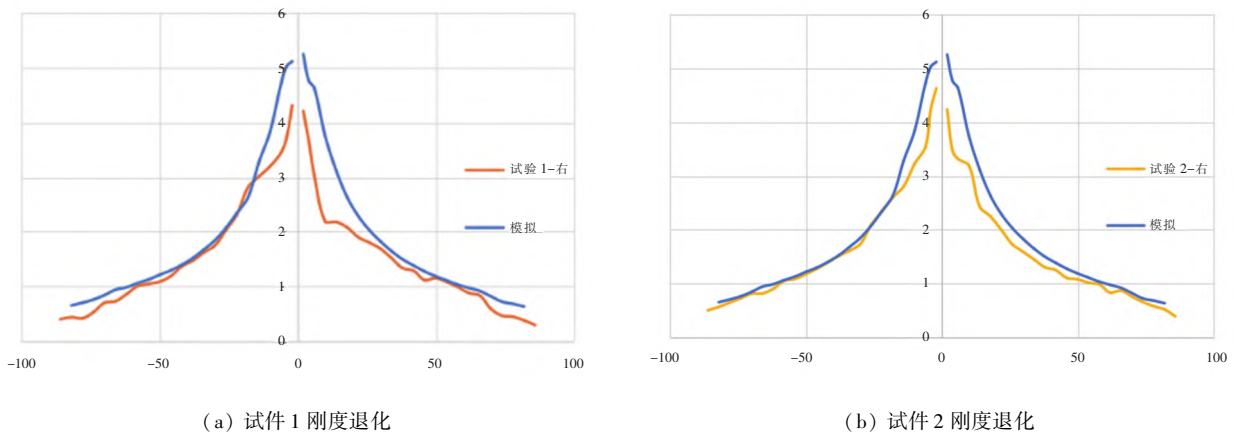


图9 刚度退化与模拟对比

Fig. 9 Comparison of stiffness degradation

根据试件1和试件2试验与模拟耗能以及阻尼系数对比可知,无论试验还是模拟分析,滞回耗能值均为伴随位移的逐渐增加而不断加大。模拟的滞回耗能比试验的滞回耗能上升更为迅速,中后期加载中模拟的滞回耗能数值远大于试件的耗能值,原因在于试验中型钢和混凝土在加载后期会发生粘结滑移情况,导致滞回曲线出现了逐渐捏缩的情况,滞回耗能相对很低,模拟却是在理想条件下对试件进行模拟分析,因此模拟

的滞回耗能数值要远大于试验值,节点在理想状态下的耗能能力非常好,且能够达到型钢混凝土节点的耗能水平。

3 结论

试验对2个相同的组合板节点试件1和试件2进行了拟静力试验研究和有限元模拟,针对其滞回曲线、刚度及耗能进行了逐步分析,并对节点所用的EPS混凝土性能进行分析,得出以下结论:

(1) 该节点采用二次浇筑的形式和装配形式可用于装配式组合结构。因采用二次浇筑形式使得各部件组装前或组装时可预先完成,有效缩短了施工工期。该节点无需在现场进行钻孔,这不仅省去了预先打孔的步骤也解决了施工时精准对位难的问题,极大提高了现场施工效率。采用型钢连续连接的方式,尽可能实现节点区域各装配构件传力的连续性,使节点的结构性能更加接近于全现浇结构。

(2) 对该节点进行的模拟和试验所得的破坏形式均为板端塑性铰破坏,完全吻合了抗震设计“强节点弱构件、强剪弱弯、强竖向弱横向”的要求。

(3) 试件在反复荷载的作用下,性能受到较小影响,在各级加载之下节点强度退化较小,具备较好的恢复能力;且在试验结束后型钢没有被破坏,故该节点在地震作用下仍然具备相对稳定的承载力。节点破坏前可以发生较大位移,有着较好的延性特征,可在地震作用下表现出较强的变形能力,遭受结构破坏的可能性较低。

参 考 文 献

- [1] 李滨. 我国预制装配式建筑的现状与发展[J]. 中国科技信息, 2014(7):114-115.
- [2] 蒋勤俭. 国内外装配式混凝土建筑发展综述[J]. 建筑技术, 2010, 41(12):1074-1077.
- [3] 杨春辉, 刘学军, 陶源, 等. 装配式组合结构节点研究进展综述[J]. 混凝土, 2023(3):141-147.
- [4] YAN W, MU T, XIE Z, et al. Experimental investigation of typical connections for fabricated cold-formed steel structures[J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(1):141-155.
- [5] SHUFENG L, QINGNING L, HAO Z, et al. Experimental study of a fabricated confined concrete beam-to-column connection with end-plates[J]. Construction and Building Materials, 2018, 158:208-216.
- [6] 吴涛, 成然, 刘全威. 钢制灌浆套筒连接性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, 50(3):309-316.
- [7] NZABONIMPA J D, HONG W, KIM J. Nonlinear finite element model for the novel mechanical beam-column joints of precast concrete-based frames[J]. Computers & Structures, 2017, 189:31-48.
- [8] GHAYEB H H, RAZAK H A, SULONG N H R. Development and testing of hybrid precast concrete beam-to-column connections under cyclic loading[J]. Construction and Building Materials, 2017, 151:258-278.
- [9] 崔正荣. 装配式建筑钢混组合结构预制构件精准制作施工技术[J]. 建筑施工, 2023, 45(7):1341-1344.